SWAT 및 HEC-RAS 모형의 수문-수리 연계모델링을 통한 곤지암천 유역의 하천범람 및 토사유출 피해저감 연구 - 2011년 7월 27일 국지성 폭우를 대상으로 -

Study on Damage Reduction by Flood Inundation and the Sediments by SWAT and HEC-RAS Modeling of Flow Dynamics with Watershed Hydrology - For 27 July 2011 Heavy Storm Event at GonjiamCheon Watershed -

정충길* · 조형경* · 유영석* · 박종윤* · 김성준**†

Jung, Chung Gil · Joh, Hyung Kyung · Yu, Yeong Seok · Park, Jong Yoon · Kim, Seong Joon

ABSTRACT

This study is to evaluate flood inundation and to recommend measures of damage reduction on sediment by concentrated torrential rainfall at Gonjiamcheon Watershed (183.4 km²). Firstly, the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) was simulated streamflow and sediment at upstream. Then, we produced a map of floodplain boundary by using HEC-RAS (Hydrologic Engineering Centers River Analysis System) at downstream. The SWAT model was calibrated with 2 years (2008~2009) daily streamflow and validated for another years (2010~2011. 7. 31). The SWAT model was simulated with 3 years (2008~2010) by monthly water quality (Sediment) at Gonjiamcheon water quality station. The streamflow and sediment from SWAT model were input as boundary conditions to HEC-RAS. The results of HEC-RAS indicated that mapping of floodplain boundary was Jiwol and Jiwol 2 district. Additionally, inundation area and depth were assessed and applied BMPs scenario for managing the sediment yield.

Keywords: 비점오염원, SWAT, HEC-RAS, 토사유출, 하천범람, BMPs, SWAT-CUP, Streambank stabulization, Porus gully plug

1. 서 론

지구 온난화로 인한 기후변화는 국지성 호우의 빈도와 강도를 증가시켰으며, 이는 세계의 여러 나라들보다 특히 연 강수의 50 % 이상이 6, 7, 8월에 집중되는 대한민국에 더 큰 영향을 주었다 (Ho and Kang, 1988). 단시간에 많은 강우량을 보이는 국지성 호우의 경우 토양 유실의 직접적인 원인이 되며, 이로 인해 댐, 하천 등에서의 탁수 문제가 큰 사회적, 환경적 문제로 대두되고 있다. 유역의 토양유실로 인하여 발생하는 문제를 해결하기 위해서는 토양 유실의 시공간적 발생 현황 및 거동 특성에 관한 연구가 필요하고, 이를 위해서는 전체 유역의 출구뿐 아니라, 유역의 각 소 유역 출구지점에서의 장기간의 모니터링 및 자료 분

석이 필요하다. 하지만 장기간의 모니터링은 항상 많은 예산, 인력, 장비를 필요로 하고, 이는 정확한 토양 유실을 모의하는데 많은 어려움을 야기 시킨다 (Choi et al., 2009).

하천은 물리적으로 하도 (하상)와 유수로 구분할 수 있으며, 이러한 하도와 흐름의 변화를 예측하는 것은 이수, 치수, 그리고 하천생태의 환경적인 영향을 고려하는데 필수적인 요소이다. 하도와 유수는 끊임없는 상호작용을 통하여 평형상태를 찾아가며, 이러한 과정에서 하상 변동이 발생하게 된다. 또한 하상변동에 있어서 하천 유사와 오염물질의 이송 및 거동 해석은 빼놓을 수 없는 부분이다. 그 뿐만 아니라 유역의 토양침식에 따른 퇴사량이 미치는 영향은 그 중요성을 아무리 강조해도 모자람이 없을 것이다 (Guk et al., 2010).

Kang (2008)은 우리나라의 유역 관리상의 치수 시설의 대부분은 설계 강우량에 대응하도록 되어있으나 계획 규모를 상회하는 홍수량까지 보충하지 않는다고 발표하였다. 이를 바탕으로 과잉 홍수가 발생한 경우에 있어서 치수시설에 과도한 안심감 및 의존성은 인적 피해의 확대에 이르는 원인이 된다고 할 수 있다. 유역의 최상류의 산복 사면에서 하천 하류까지의 토사가 이동하

* 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과
** 건국대학교 사회환경시스템공학과 교수
† Corresponding author Tel.: +82-2-450-3749
Fax: +82-2-444-0186
E-mail: kimsj@konkuk.ac.kr

2011년 12월 29일 투고
2012년 3월 6일 심사완료
2012년 3월 6일 게재확정

는 영역에 있어서, 토사나 홍수의 범람, 댐과 저수지에서의 퇴사, 하상 저하에 따른 인공 구조물의 기초부 손상, 해안 침식 등에서 볼 수 있는 토사 이동에 관련된 문제가 발생하고 있다 (Kang, 2008). 이를 토대로 본 연구에서는 2011년 7월 27일 갑자기 불어난 물로 주변 도로와 주택가의 침수피해와 동시에 유출 토사로 인한 피해를 입은 경기도 광주시 곤지암천 유역에서의 실제 침수지역 및 피해, 유역의 하천범람, 토사 산출, 하도 내 이송 및 하류에서의 토사의 침식을 환경부공간정보 토지이용도자료를 입력자료로 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)모형과 HEC-RAS (Hydrologic Engineering Centers River Analysis System)모형으로 모의하여 2011년 7월 27일 곤지암천 유역에서 발생한 국지성 폭우에 대한 유출침수심과 토사유출에 따른 퇴적량과 토사피해 저감을 위한 최적관리기법 적용 효과를 분석하였다.

II. 재료 및 방법

1. 대상유역 및 입력자료

본 연구에서는 2011년 7월 27일 시간당 120 mm 기록적인 폭우로 범람 및 제방유실 등이 발생한 곤지암천 유역을 대상유역으로 선정하였으며 대상유역을 총 4개의 소유역으로 구분하였다 (Fig. 1). 곤지암천은 행정구역상으로 경기도 광주시 초월읍, 곤지암읍의 산이리, 곤지암리, 지월리 및 늑현리 등 6개면에 걸쳐 펼쳐진 하천으로 경안천에 합류되는 큰 지류로서 수도권 상수원인 팔당호 수질관리에 매우 중요한 지표로서 이용된다. 곤지암천 상류부에서의 수질관리 및 치수관리는 필수적으로 이루어져야 하며 그 저감대책 또한 병행해야 된다. 또한 상습 침수지역으로 그 필요성에 따라 침수피해 및 토양유실 예방에 따른 오염

원 발생이 하천 수질에 직접적인 영향을 미칠 것으로 판단되어 유역 내에 폭우에 따른 모의 기작 평가대상으로 적절하다고 판단되어 본 유역을 선정하였다. 곤지암천 유역은 유로연장 23.7 km이며 유역면적은 183.4 km²이다. 유역평균표고 180.3 m, 지난 10년간 연평균 강우량은 1297.2 mm, 연평균 기온은 12.7 °C이며 유역 내 토지이용분포 중 논, 밭은 각각 9.4 %, 8.7 %로 13.6 km² 및 14.6 km²로 이루어져 있다. 곤지암천 유역은 총 유로연장에 비해 유역면적이 크며 상류부에 계곡 폭이 다소 좁은 협곡을 이루고 있다. 하류부는 하천연안을 중심으로 비교적 넓은 평야를 형성하고 있다. 평야를 중심으로 평지가 많아 주민의 대부분이 농업에 종사하고 밭보다 논이 많아 벼농사가 발달되어 있다.

기본 지형입력자료 구축을 위하여 NGIS (National Geographic Information Systems)의 1:25,000 수치지도로부터 격자크기 30 m의 DEM (Digital Elevation Model)을 제작하고 (Fig. 2a), SWAT

Fig. 1 The Location of Study Area: Gonjiam Cheon Watershed

Fig. 2 Spatial Input Data

모형의 자동경계추출 (Automatic Delineation) 모듈에서 DEM을 입력자료로 하여 지형전처리 과정을 수행하였다. 토지이용 정보는 증발산, 침투, 지표유출 등의 수문학적 구성 요소들에 영향을 미치며, 이러한 토지이용의 영향은 유출량의 변화뿐만 아니라 질소와 인으로 대표되는 비점오염원 부하량에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 수문해석 및 비점오염원 평가에 있어 필수 정보 중에 하나인 토지이용도는 환경부로부터 환경공간정보를 분석하기 위해 1:25,000 제공받았다 (Fig. 2b). SWAT 모형은 토양층을 중심으로 물수지를 파악하는 모형이므로 토양통 자료를 구축하는 것이 핵심이다 (Kim et al., 2006). 이를 위해 토양도는 농촌진흥청에서 제공하는 1:25,000 정밀토양도를 기준으로 분류하였다 (Fig. 2c).

모형의 입력자료가 되는 기상자료는 서울, 수원, 이천 및 양평 관측소지점에서의 강수량, 온도, 태양복사량, 풍속, 상대습도 자료를 구축하였다. 모형의 보정을 위한 실측자료는 국가수자원관리종합정보시스템 (Water Resources Management Information System, WAMIS)에서 제공하는 유역 출구 지점부에 위치해 있는 도평 수위관측소에서의 수위자료 (2008 ~ 2011. 7. 31)를 유량자료로 환산하여 사용하였으며, 수질자료는 환경부 곤지암천 수질관측망에서의 유사량 (Sediment) 농도자료를 2008 ~ 2010년 자료를 구축하여 오염 발생량으로 환산하였다.

2. SWAT 모형 개요

수문·수질모의를 위한 모형으로 미국 농무성 (United States Department of Agriculture, USDA) 농업연구소 (Agricultural Research Service, ARS)에서 개발한 SWAT (Arnold 등, 1993; Arnold 등, 1995)모형을 선정하였다. SWAT 모형은 물리적 기반의 준 분포형 장기 강우-유출 모형으로서, 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 유출과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리 방법의 영향을 예측하기 위해 개발된 모형으로 수문, 토양유실, 영양물질, 하도추적의 4가지 부모형으로 구성되어 있다. 이 중 수문 부모형에서는 토양과 토지이용조건에 의해 결정되는 수문반응단위 (Hydrologic Response Unit, HRU)로 SCS 유출곡선법 (1972)과 Green & Ampt 침투법 (1911)을 이용하여 지표유출량을 산정하며, 측방유출량은 Sloan 등 (1983)에 의해 개발되고 Sloan과 Moore (1984)에 의해 정리된 동역학적 저류모형 (Kinematic Storage Model)을 이용한다 (Park et al., 2008).

SWAT 모형에서 강우와 유출에 의한 침식은 수정범용토양유실공식 (MUSLE : Modified Universal Soil Loss Equation, Williams, 1975)에 의해 계산된다. MUSLE는 Wischmeier와

Smith (1965, 1978)에 의해 개발된 범용토양유실공식 (USLE : Universal Soil Loss Equation)의 수정 버전이다. USLE에서는 강우에너지의 함수로서, 평균 연간 총 침식량을 예측하는 반면, MUSLE에서는 강우에너지 인자가 유출인자로 대체된다. 이로서 유사량 예측을 개선하고, 운송비가 불필요하게 되며, 각각의 호우사상에 대하여 적용이 가능해진다. 수정범용토양유실공식 (Williams, 1995)은 다음 식 (1)과 같다.

$$Sed = 11.8 \times (Q_{surf} \times q_{peak} \times area_{hru}) \quad (1)$$

$$\times 0.56 \times K \times C \times P \times LS \times CFRG$$

여기서, Sed 는 주어진 날의 유사량 (ton), Q_{surf} 는 지표유출량 (mm/hr), q_{peak} 는 침투유출율 (m^3/s), $area_{hru}$ 는 HRU 면적 (ha), K 는 USLE 토양침식성인자, C 는 USLE 피복 및 관리인자, P 는 USLE 관행인자, LS 는 USLE 지형인자, $CFRG$ 는 조립파편인자이다 (Park et al., 2008).

3. HEC-RAS 모형 개요

HEC-RAS 모형은 미 육군 공병단에서 개발한 1차원 수리해석모형으로, 2001년 기존의 HEC-2 모형을 보완하여 개발되었으며, 현재 홍수범람이나 침수해석을 위하여 국내외적으로 가장 많이 사용되고 있다. HEC-RAS 모형은 상류, 사류, 한계류가 혼합하는 구간에서 계산이 가능하고 단일하천, 수지상하천, Loop형 하천 및 합류점 해석 시 에너지 방정식과 운동량 방정식을 이용하여 해석이 가능하며, 다양한 강우 조건에 대한 홍수위 산정이 용이하도록 개발되었다 (Kim, 2004; Park, 2003). 1차원 하상 변동 프로그램 HEC-RAS는 하천 실무에서 널리 사용되고 있다. HEC-RAS 모형은 자연하천이나 인공하천에서의 정류 (Steady Flow) 상태의 점변류 수면곡선의 계산을 위해서 개발되었다. 하지만 이외에도 비정상류 (Unsteady Flow), 이동하는 침전물 운반 계산, 교량의 세굴 계산을 할 수 있다. 뿐만 아니라 수공구조물의 영향을 수면곡선에 반영할 수 있으며, 하천의 홍수터 잠식과 제방의 영향을 평가하는데도 유용하게 사용된다. 수면곡선의 계산은 식 (3)의 에너지 방정식이 기본이 된다. 여기서 이용하는 방법이 표준축차법으로 미지의 단면과 그 다음 단면사이의 값을 에너지 방정식에 의해서 반복적으로 계산하게 된다. 여기서 최초의 단면의 값은 그 다음 단면의 값을 산출해 내는데 사용된다.

4. SWAT 및 HEC-RAS 모델링 연계

본 연구에서는 유역 하류부의 토양 유실에 따른 토사의 침식 및 퇴적량을 분석하고자 유역의 토사량을 산정한 후 하도 내 이

송과 침식, 퇴적 과정에 주안점을 두어 이 두 가지 과정을 모두 모의할 수 있는 토사 거동 모의를 위한 연계 모델링을 하고자 하였다. 먼저, 유역 유사 유출량을 추정하기 위해 SWAT 모형을 적용하였다. SWAT 모형은 토사유출산정기법에 MUSLE 기법을 사용하고 있으며 GIS를 기반으로 한 각 토사유출 인자들을 산정하여 SWAT 모형에서 모의 후 유사량 실측값과 적용성을 평가한 후 일별 토사유출량을 산정하였다. 그 전에, SWAT-CUP 모형을 이용하여 유역 내 불확실성의 민감도가 높은 매개변수를 선정한 후, 실측값과의 최적화를 위한 SUFI2 분석기법을 이용하여 매개변수를 최적화 하였다. 그 후, 하도 내 토사 이송 추정은 HEC-RAS 모형을 이용하여 해석하였다. SWAT 모형에서 계산된 토사유출량을 이용하여 상류단 유입 유사량과 유량-유사량 관계곡선을 작성함에 있어서 입력자료로서 활용하였다. 횡단면 측정 단면을 이용하여 모형에 입력, 장기모의를 통한 곤지암천 유역 하류부에서의 토사량과 홍수위를 산정하여 주변 지역에서의 연도별 토사 발생량과 홍수범람 위험성을 정량적으로 살펴보았다. 또한, 저감대책으로써 실제 문헌을 참고하여 토양유실보전에 해당하는 비구조적 최적관리기법 (Best Management Practices, BMPs)를 적용함에 따른 하류부에 토사의 저감효과를 분석하고 갑작스런 폭우 발생 시에 홍수 범람을 막기 위한 구조적 저감대책을 살펴보았다.

III. 결과 및 고찰

1. SWAT 모형의 검·보정

매개변수 추정을 위하여 SWAT의 입력유형별 매개변수를 정리하여, 총 유출량 및 침투유량과 감수곡선 형태에 영향을 미치는 매개변수와 유사량 발생량 보정을 위한 매개변수를 SWAT-CUP 모형을 이용하여 유역별 불확실성을 분석하고 민감도 분

석에 따른 최적의 매개변수를 선정하였다. 지표수흐름관련 매개변수로는 ALPHA_BF, ESCO 순으로 민감하게 반응하였고, 지하수흐름은 GWDELAY, GW_REVAP 순으로 나타났다. Sediment 매개변수로는 LAT_SED와 CH_EROD가 가장 민감하였다.

모형에 대한 유출량 검·보정은 총 4개년도 (2008 ~ 2011. 7. 31)동안 모의를 실시하였으며 2개년 (2008~2009)동안 유역 출구지점에서의 총 유출량을 이용하여 보정하였으며, 2개년 (2010 ~ 2011 7. 31)간의 자료를 대상으로 검증을 실시하였다. 유역출구에서의 유사량 실측값의 부재로 인해 유사량의 검·보정은 총 3개년도 (2008~2010)동안 36개의 일단위 실측자료를 바탕으로 모의를 실시하며 유출량과 동일하게 2개년 (2008~2009)동

Table 1 The SWAT results of streamflow during calibration and validation periods (2008~2011. 7. 31)

Period	PCP (mm)	Discharge (m ³ /s)		Runoff ratio (%)		R ²	ME
		Obs.	Sim.	Obs.	Sim.		
Calibration	2008	1193.5	696.1	672.7	58.3	56.3	0.73
	2009	1337.0	666.6	862.1	50.0	64.4	0.82
Validation	2010	1616.0	750.0	977.2	46.4	60.4	0.61
	2011.	1580.0	764.5	1028.5	48.4	65.0	0.88

Obs.: Observed data, Sim.: Simulated data, PCP : Precipitation

Table 2 Summary of statistics for annual NPS pollution loads for the SWAT calibration and validation periods (36days)

Year	PCP (mm)	Sediment (ton)		
		Obs.	Sim.	R ²
2008	1193.5	3.4	4.4	0.64
2009	1337.0	15.3	22.2	0.71
2010	1616.0	55.9	41.5	0.63
Mean	1382.2	24.9	22.7	0.61

Obs.: Observed data, Sim.: Simulated data, PCP : Precipitation

Fig. 3 Comparison of correlation between observed and simulated sediment

안 동일지점에서의 유사량을 보정하였으며, 1개년 (2010)동안의 자료를 대상으로 검정을 실시하였다. 그러나 실제 2011년 갑작스런 폭우로 인한 토양유실량을 분석하기 위해 검·보정기간 이외에 2011년 7월 31일까지 모의를 하여 검증이 이루어졌다는 전제조건하에 모의 값을 산출하였다. 결과의 적합성과 상관성을 판단하기 위해서 결정계수 (R^2)와 모형의 효율성 검증은 Nash and Sutcliffe (1970)가 제안한 모형 효율성계수 (Model Efficiency, ME)를 사용하였다. Table 1은 유출결과, Table 2는 수질결과를 연도별로 정리한 것이다. 유출량에 대한 R^2 는 0.61~0.88, ME는 0.58~0.81이었고 유사량에 대한 R^2 은 0.58~0.81의 범위를 보였다. Table 2에서의 연도별 유사량 (Sediment) 실측 총량 값은 매달 특정일자에 1~2번 측정된 유사량 실측부하량으로 3년 동안에 총 36 자료로부터 동일일자에 모의된 결과 36 개의 총 부하량을 계산하여 비교한 결과이며 Fig. 3은 연도별 실측 및 모의 유사량의 상관성을 비교한 그래프이다.

2. HEC-RAS 모형의 모의 결과

가. 범람 모의 결과

SWAT 모형의 홍수해석결과에 따른 홍수범람도 작성을 위한 후처리 과정은, HEC-RAS의 후처리 모듈인 HEC-GeoRAS 모듈

을 이용하였다. HEC-GeoRAS는 HEC-RAS 모형의 지형자료를 처리하기 위해 미 공병단 (U.S. Army Corps of Engineers)의 수공학센터 (Hydrologic Engineering Center)와 미국의 GIS 솔루션 개발업체인 ESRI (Environmental Systems Research Institute)에서 개발한 AcrView, ArcMap의 확장모듈이다. HEC-GeoRAS 확장모듈은 HEC-RAS 모형의 GIS 전후처리 시스템으로 HEC-RAS 모형의 지형 관련 입력자료를 생성하는 Pre RAS와 홍수범람도를 작성할 수 있는 Post RAS로 나뉜다. HEC-RAS 모의결과를 토대로 HEC-GeoRAS 모듈을 이용하여 7월 27일의 홍수 이벤트가 적용 된 홍수범람도를 작성하였다.

해당 유역의 홍수피해지역은 하천의 전 부분에서 발생하였으며, 침수면적은 약 0.38 km², 침수심은 약 0.0~6.0 m 사이인 것으로 나타났다 (Fig. 4 (a)). 7월 26일이나 28일에 모의된 결과와 비교해보면, 27일 발생한 홍수피해가 매우 심각함을 반증한다. 해당유역의 토지이용 대부분이 논지역이며, 주거지역도 포함 되어 있는 것으로 나타났다. 이로써 실제로 발생한 곤지암천 유역의 침수피해구역을 도식화하고 평가 할 수 있었다.

나. 토사 퇴적 모의 결과

유사량 공식은 모두 7가지가 탑재 되어 있으며, 사용자가 원하는 공식을 선택 할 수 있다. 이 중 본 연구는 자갈과 모래 하천

Fig. 4 Flood Depth and Accumulated Sediments

이 적용가능한, 다양한 실험 수로와 현장 자료를 이용하여 개발되고 검토된 Yang (1972)의 공식을 사용하였다. 본 공식은 수류력에 매우 민감한 경향이 있으며, 다른 공식보다 침강속도에 민감하다 (Yu and Woo, 1990). 현재의 HEC-RAS 유사 이송 계산은 준부정류 수리에 기반한다. 준부정류 접근법은 해당기간 동안의 흐름의 수문곡선을 정상류의 시계열로 근사하는 것이다. 이런 분석은 정상류나 부정류흐름과는 다른 정보를 필요로 하기 때문에 준부정류의 자료 입력은 SWAT 모형에서 일강우 자료를 바탕으로 산출된 유역 유출량을 사용하여 유입유량으로 활용하였다 (Kim, 2010).

HEC-RAS에 의해 모의된 유사량의 모의 결과를 나타냈으며 하천 전반에 걸쳐 약 1~2 m의 토사가 축적되는 결과를 나타내었다 (Fig. 4 (b), (c), (d)). 이 결과는 하상의 변동을 의미하는 것으로서 국지성 호우로 인하여 하루 만에 발생한 홍수에 의한 것임을 고려할 때, 7월 27일 발생한 강우가 매우 심각함을 반증하는 결과라고 할 수 있다. 발생한 유사량이 모두 하천에 축적되는 것으로 모의가 되었지만, 실제 유출량에 의해 부유되어 분산되는 효과를 고려한다면 그 피해가 더욱 컸을 것으로 사료된다.

3. 토양유실 저감효과 분석

가. BMPs 시나리오 및 토양유실 저감효과 분석

곤지암천 유역에 대한 모형의 검·보정이 끝난 후, 유역특성에 따른 저감효율을 비교분석하기 위해 4개의 소유역에 대한 토지 이용현황 및 지형인자를 파악한 후 각각의 알맞은 비구조적 최적관리기법 (Best Management Practices, BMPs) 시나리오를 적용하였다. 여러 BMPs 시나리오 중에 토양유실보전에 해당하는 비구조적 BMPs로 Streambank stabilization과 Porous Gully plugs (Srinivasan, 2008)를 적용하였다. 본 연구에서 선정한 2개의 BMPs 시나리오는 Srinivasan (2008), Narasimhan et al (2007)이 외국에서 기존연구가 이루어져 그 결과로부터 그 효과가 입증될 수 있는 시나리오라고 판단되어 두 가지 시나리오를 선택하였다. 기존의 연구결과들에 대한 BMPs 시나리오 적용 전 (preBMPs) 및 적용 후 (postBMPs)의 SWAT 매개변수 값을 적용하여 모의가 이루어진다. 각 시나리오를 설명하면 첫째, Streambank stabilization은 사석과 목재 등의 자연 재료를 이용하여 식생의 성장으로 하천제방을 안정화하는 방법으로 하천의 흐름에 의한 침식을 방지 및 유사 발생을 줄이고 하류에서의 오염을 줄인다. SWAT 안에서의 침식관련 매개변수 (CH_EROD), 하천 피복관련 매개변수 (CH_COV), 그리고 주하천의 거칠기를 나타내는 매개변수 (CH_N (2))를 하천차수가 3차 이상인 소유역에 적용한다. 매개변수의 값은 Narasimhan et al. (2007)과

Chow (1959)가 식생말뚝, 사석, 호안 기슭막이등을 이용, 미국의 Cedar Creek Reservoir유역에서 약 1.7 %~15.3 %의 Sediment의 저감효과를 산정한 값을 사용하였다. 두 번째 Porous gully plugs는 하천에 돌이나 나무 등을 설치, 유속을 줄여 짧은 시간 내에 발생하는 걸리 (gully)침식을 방지한다. 또한 유속이 감소함에 따라 흐르는 물에서 침식되는 힘이 줄어들어 유사 발생이 줄어들게 된다. 이때의 지류에서의 Manning의 조도계수를 나타내는 CH_N (1)의 값은 Srinivasan (2008)가 Porous gully plugs를 사용하여 1.4~30.3 %는 Sediment, 0.6~22 %는 총 질소 (Total Nitrogen, TN) 0.5~16 %는 총인 (Total Phosphorus, TP)에서 저감효과를 산정한 값을 참조하였다. 비구조적 저감대책으로 두 가지 시나리오를 선택하여 그 중 Streambank stabilization 시나리오는 주하천에 적용하는 것으로 대상유역중 2번 소유역에 적용하였으며 또 다른 토양유실 시나리오인 Porous gully plugs는 경사도가 5 % 이상인 지류부에 적용을 해야 되므로 3번 및 4번소유역에 각각의 시나리오를 적용하였으며 마지막으로 두 시나리오를 결합한 Combined scenario (Streambank stabilization and Porous gully plugs)를 통하여 세 가지 시나리오로 인한 유사량 저감효과를 BMPs 적용 전후의 저감량에 대한 백분율로 산정하여 살펴보았다.

그 결과, Streambank stabilization 시나리오의 경우 유사량 연간 제거효율이 7.7 %~14.3 %로 대체적으로 높은 제거효율을 보이는 것으로 분석되었다. 한편, Porous gully plug의 제거효율은 -3.3 %~5.8 %로 Streambank stabilization에 비해 상대적으로 제거효율이 낮은 뿐만 아니라 2008년에는 오히려 토양유사 오염물질을 증가시키기도 하였다. 이는 Porous gully plug의 제거효율은 특정강우강도 및 강우량 이상일 때 그 효율이 적절히 나타난다. 2008년도에 강우분포를 살펴보면 다른 연도에 비해 총강우량이 작을 뿐만 아니라 강우강도 분포 또한 작게 나타남으로써 Porous gully plug의 효과를 제대로 나타낼 수 없었다. 각각의 개별적인 시나리오 적용뿐만 아니라 결합된 두

Fig. 5 Removal efficiency of Sediment by applying BMPs scenario

시나리오를 적용하여 모의한 결과 제거효율은 9.5 %~13.0 % Streambank stabuluzation 시나리오 적용과 비교했을 때 전반적인 제거효율 수치는 비슷하지만 Streambank stabuluzation가 낮은 효율에 해당하는 년도에 결합된 시나리오의 토사유량 제거효율은 높게 나타났다 (Fig. 5).

IV. 결 론

본 연구에서는 곤지암천 유역을 대상으로 SWAT 모형을 이용하여 2008년~2011년 7월 31일까지의 기간동안의 상류유역의 유출량 및 유사량을 산정한 후 HEC-RAS 모형을 이용하여 하류부의 침수 및 유사이송, 퇴적량을 모의하였다. 특히 2011년 7월 말에 갑작스런 폭우에 따른 침수피해를 모의하여 침수면적과 침수심을 산출하였고 유사량 퇴적에 따른 피해 저감을 위한 최적관리기법을 적용하여 그 적용 효과를 분석하였다.

첫 번째 단계로 SWAT 모형에서 곤지암천 상류유역에서의 모의된 유출량 및 유사량이 하류부에서 모의된 HEC-RAS의 경계조건으로 입력된다. 하류부 HEC-RAS 모의결과 침수면적은 약 0.38 km²이며 침수심은 약 0.0~6.0 m로 그 주변지대의 침수피해가 일어남을 나타냈다. 또한, 침수뿐만 아니라 유출에 따라 흘러내려온 유사량은 하천 전반에 걸쳐서 1~2 m 퇴적됨을 나타냈다. 이 결과로부터 침수심이 최대 6 m를 나타내므로 구조적으로 제방높이는 여유고를 감안하여 8 m 이상을 유지하도록 요구되어진다.

다음단계로 유출증가에 따른 토사이송에 따른 하류부에서의 퇴적량은 하천 전반에 걸쳐서 1~2 m로 그 피해를 줄이기 위한 비구조적 저감대책 요구되어진다. 따라서 토양유실 보전 BMPs의 종류인 Streambank stabilization 및 Porous gully plugs 시나리오를 적용하여 토사량의 제거효율을 비교분석하였다. 저감효과를 살펴보면 Streambank stabilization 시나리오가 저감율이 높게 나타났으며 연간 저감효율을 살펴보면 Streambank stabilization은 각각 7.7 %~14.3 %, Porous gully plugs는 -3.3 %~5.8 %이며 두 시나리오를 결합하여 동시에 적용한 결과 저감효율은 9.5 %~13.0 %로 나타났다.

본 연구는 2011년 7월 27일 갑자기 불어난 물로 주변 도로와 주택가의 침수피해와 동시에 유출 토사로 인한 피해를 입은 경기도 광주시 곤지암천 유역에서의 실제 침수지역 및 피해, 유역의 하천범람, 토사 산출, 하도 내 이송 및 하류에서의 토사의 침식을 SWAT 모형과 HEC-RAS 모형으로 모의하여 그에 따른 비구조적 저감대책을 세우고자 하였다. 비구조적 저감대책으로 적용한 두 가지 시나리오는 토양유실을 저감함으로써 강우시 발생하는 하천수질오염을 줄일 수 있으며 부수적인 침수피해를 막는 역할을 할 것으로 기대된다. 그러나 실제적으로 BMPs

적용 및 비구조적 저감대책을 마련하고자 필요한 경제성 측면은 고려되지 않아 추후 연구에서는 BMPs 시행 및 독 높이기로 발생하는 손해비용 및 투자비용에 대한 경제성 평가를 측정하여 종합적인 평가가 이루어져야 한다.

이 논문은 2009년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2009-0080745).

REFERENCES

1. Arnold, J. G., P. M. Allen, and G. Bernhardt, 1993. A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of Hydrology* 142: 47-69.
2. Arnold J. G., J. R. Williams, and D. R. Maidment, 1995. Continuous-time water and sediment-routing model for large basin. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 121(2): 171-183.
3. Choi, J. W., G. W. Hyun, J. W. Lee, D. S. Shin, K. S. Kim, Y. S. Park, J. G. Kim, and K. J. Lim, 2009. Evaluation of Sediment Yield Prediction and Estimation of Sediment Yield under Various Slope Scenarios at Jawoon-ri using WEPP Watershed Model. *Journal of Korean Society on Water Quality* 25(3): 441-451 (in Korean).
4. Chow, V. T., 1959. Open-channel hydraulics: New York, McGraw- Hill Book Co., 680.
5. Green, W. H. and G. A. Amp, 1911. Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Sciences* 4: 11-24.
6. Guk, S. P., S. J. Park, and H. K. Choi, 2010. The Estimation of Soil Runoff in the Man-dae Cheun Basin by the using RUSLE Method. *Journal of Industrial Technology, Kangwon Natl. Univ., Korea* 30(B): 99-108 (in Korean).
7. Ho, C. H., and I. S. Kang, 1988. The Variability of Precipitation in Korea. *Journal of Korean Met. Society* 24(1): 38-48 (in Korean).
8. Kang, S. H., 2008. Charancterstics of Sediment Movement and Local Peoples' Countermeasur for Evacuation - focused on Inje areas of Kangwon-do -. *Journal of GIS Association of Korea* 16(1): 11-17 (in Korean).

- Korean).
9. Kim, D. G., 2010. Sediment Budget Analysis of the Naesung-cheon Watershed using SWAT and HEC-RAS. Ph. D. diss., Dong-Eui University (in Korean).
10. Kim, H., 2004. Probable Agricultural Inundation Areas Using Regional Frequency Based Rainfall Data and HEC-RAS Model. Ph. D. diss., Seoul National University (in Korean).
11. Narasimhan, B., P. M. Allen, R. Srinivasan, S. T. Bednarz, J. Arnold, and J. A. Dunbar, 2007. Streambank erosion and best management practice simulation using SWAT. In: Proceedings of 4th conference on 'Watershed management to meet water quality standards and TMDLs', San Antonio ASABE publication #701P207: 10-14.
12. Nash, J. E., Sutcliffe, J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models Part I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3): 282-290.
13. Park, J. M., 2003. Development of GIS Based Farmland Flooding Damage Simulation System. Ph. D. diss., Seoul National University (in Korean).
14. Park, J. Y., M. S. Lee, Y. J. Lee, and S. J. Kim, 2008. The Analysis of Future Land Use Change Impact on Hydrology and Water Quality Using SWAT model. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 28 (2B): 187-197 (in Korean).
15. Ritche, J. T., 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research*, 8: 1204-1213.
16. Sloan, P. G., and I. D. Moore, 1984. Modeling subsurface stormflow on steeply sloping forested watersheds. *Water Resources Research*, 20(12): 1815-1822.
17. Sloan, P. G., I. D. Moore, G. B. Coltharp, and J. D. Eigel 1983. Modeling surface and subsurface stormflow on steeply-sloping forested watersheds. Water Resources Inst., Report 142, Univ. Kentucky, Lexington.
18. Soil Conservation Service, 1972. Section 4 : Hydrology In National Engineering Handbook, SCS.
19. Srinivasan, R., 2008. Bosque river environmental infrastructure improvement plan: Phase I final report. 10-13. TR-312. Texas Water Resources Institute. Texas A & M University, College station.
20. Yu, K. K., and H. S. Woo, 1990. Comparative Evaluation of Some Selected Sediment Transport Formulas. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 10(4): 67-75 (in Korean).
21. Williams, J. R., 1975. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor, In present and prospective technology for predicting sediment yield and sources, ARS-S-40, USDA-ARS.
22. Williams, J. R., 1995. The EPIC model, In Computer models of watershed hydrology, Singh, V.P., (ed.), Chapter 25, 909-1000, Water Resources Publications.
23. Wischmeier, W. H., and D. D. Smith, 1965. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains, Agriculture Handbook 282, USDA-ARS.
24. Wischmeier, W. H., and D. D. Smith, 1978. Predicting rainfall-erosion losses : a guide to conservation planning, Agriculture Handbook 282, USDA-ARS.
25. Yang, C. T., 1972. Unit stream power and sediment transport. *J. of the Hyd. Div.*, ASCE, 99(HYD10): 1805-1826.